

## ПРОЦЕССЫ САМООРГАНИЗАЦИИ И ЭВОЛЮЦИИ МИКРОСТРУКТУРЫ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

*Ключевые слова:* сварка взрывом, микроструктура металлов, фрагментация.

Результаты электронно-микроскопического исследования структуры нескольких десятков сварных соединений позволили нам выявить процессы, контролирующие формирование соединений при сварке взрывом. Оказалось, что таких процессов не так уж много. Основными являются фрагментация двух типов, образование выступов, всплесков и волн, локальное расплавление [1–3].

Локальное расплавление наблюдается для многих сварных соединений. Было впервые обращено внимание на возникновение коллоидных растворов при сварке взрывом и сформулированы необходимые для этого соотношения между характерными температурами [2]. Для соединений медь – тантал зоны локального расплавления заполнены суспензией тантала в меди (расплавленной, а затем застывшей), что обеспечивает их дисперсионное упрочнение. Кроме того, именно указанные зоны обеспечивают точечное склеивание свариваемых металлов. Они образуют многочисленные «капсулы», хаотически распределенные по поверхности раздела между слоями тантала и меди в стенке химического реактора. И наличие таких «капсул» не мешает стабильности конструкции и сохранению уникальной коррозионной стойкости тантала в течение длительного времени эксплуатации. Это является убедительным доказательством того, что локальное расплавление не всегда является опасным.

Фрагментация одного типа подобна фрагментации при интенсивной деформации, наблюдаемой во многих материалах. Нам удалось обнаружить и идентифицировать ранее неизвестный процесс фрагментации, который своим существованием обязан взрыву. Фрагментация, обусловленная взрывом, была названа фрагментацией типа дробления (ФТД). Именно этот вид фрагментации ближе всего к фрагментации при взрыве. И лучшее название для этого вида фрагментации при сварке было бы «осколочная фрагментация», но такое название не имеет адекватного английского аналога.

Фрагментация типа дробления является универсальным явлением: не было ни одного из исследованных сварных соединений, где бы она ни была обнаружена [4]. Это основной диссипативный канал, по которому уходит подводимая за счет взрыва энергия.

Были найдены неоднородности на поверхности раздела, которые были названы выступами. Они действуют подобно «клиньям», связывая друг с другом контактирующие поверхности. Было обнаружено, что при определенных условиях выступы напоминают всплески на воде, хотя являются твердофазными. Самоподобный характер всплесков при сварке взрывом был фактором, инициировавшим фрактальное описание поверхности раздела. Если предположить, что всплески являются предвестниками волн, их роль резко возрастает, поскольку проблема волнообразования является фундаментальной и пока еще не решенной.

Известны две формы поверхности раздела сварного соединения: плоская и волнообразная. Исследование переходных состояний между ними ранее не проводилось. Оно требует набора соединений, получаемых при промежуточных режимах сварки. В результате была выявлена последовательность структурных состояний поверхности раздела, сменяющих друг друга по мере интенсификации режима сварки [5]. Ниже нижней границы (НГ) окна свариваемости структура состоит из изолированных выступов. Вблизи НГ на плоской поверхности возникают всплески. Несколько выше НГ наблюдается структура, названная квазиволновой, которая содержит одновременно и волны, и всплески. Внутри окна свариваемости, ближе к его центру, наблюдается достаточно совершенная волнообразная поверхность.

Одна из наиболее успешных реализаций сварки взрывом была использована для получения стенки химического реактора. Причиной ее высокого качества и стабильности является стационарный характер пространственно однородной волнообразной поверхности раздела медь – тантал. Если бы для композита, образующего стенку, указанная поверхность находилась в переходном состоянии, то в процессе эксплуатации такое состояние менялось бы, причем, из-за неоднородности деформации, в разных местах по-разному. В результате стенки реактора не могли бы выдержать столь длительного времени эксплуатации, о котором говорится в [1, 2].

Перечислим обнаруженные в результате исследования процессы и структуры: фрагментация типа дробления, выступы, всплески, квазиволновая поверхность раздела.

*Авторы благодарят Фонд РФФИ (грант № 17-02-00025) за поддержку и интерес к работе.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. The problem of intermixing of metals possessing no mutual solubility upon explosion welding / B. A. Greenberg, M. A. Ivanov, V. V. Rybin [et al.] // Materials Characterization. 2013. Vol. 75. Pp. 51–62.
2. Microheterogeneous Structure of Local Melted Zones In The Process Of Explosive Welding / B. A. Greenberg, M. A. Ivanov, A. V. Inozemtsev [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions – A. 2015. Vol. 46. № 8. Pp. 3569–3580.
3. Formation of intermetallic compounds during explosive welding / B. A. Greenberg, M. A. Ivanov, M. S. Pushkin [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions – A. 2016. Vol. 47. № 11. Pp. 5461–5473.
4. Besshaposhnikov Risk zones for coke drum shell produced by explosive welding / B. A. Greenberg, O. A. Elkina, A. M. Patselov [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. 2015. №15. Pp. 79–86.
5. The structure of molten zones in explosion welding (aluminium–tantalum, copper – titanium) / B. A. Grinberg, M. S. Pushkin, A. M. Patselov [et al.] // Welding International. 2017. 31:5. Pp. 384.